

컴퓨터 지원 척추 수술

강성식 • 이동봉[✉] • 김호중 • 염진섭

서울대학교 의과대학 분당서울대학교병원 정형외과학교실, 척추센터

Computer-Assisted Spine Surgery (CASS)

Sung Shik Kang, M.D., Dong-Bong Lee, M.D.[✉], Ho-Joong Kim, M.D., and Jin S. Yeom, M.D.

Department of Orthopaedic Surgery, Spine Center, Seoul National University Bundang Hospital,
Seoul National University College of Medicine, Seongnam, Korea

Computer-assisted spine surgery (CASS) is a new discipline involving application of computer engineering and mechanical engineering to spine surgery. The tools used most commonly include preoperative surgical simulation, intraoperative navigation, and robot-assisted surgery. Surgical simulation has been utilized for both clinical and basic research. Navigation in spine surgery has focused on guidance of screw placement, however, due to limited accuracy and high cost, its use is somewhat sparse. CASS may be combined with minimal invasive spine surgery in the near future. Further validation of clinical accuracy issues and surgical outcomes as well as cost-benefit analysis is required.

Key words: computer-assisted orthopaedic surgery, computer-assisted spine surgery, surgical simulation, intraoperative navigation, surgical robot

컴퓨터 지원 척추 수술(computer-assisted spine surgery, CASS)의 개요

척추 수술은 정형외과 수술 중에서 가장 높은 수술 정밀도를 요하는 수술 중의 하나이다. 높은 수술 정밀도는 과거에는 수술자의 개인적인 수술 기술과 경험을 통해서만 얻을 수 있었으나, 최근 컴퓨터 공학과 기계 공학의 발달로 인해, 이러한 정밀한 작업을 컴퓨터나 로봇의 도움을 통해서 수행하려는 노력이 진행 중이다. 컴퓨터 지원 척추 수술은 척추외과학과 컴퓨터 공학(컴퓨터 그래픽스 및 가상 현실), 기계 공학이 융합되어 탄생된 새로운 분야이다.¹⁾ 이는 크게 수술 전 지원과 수술중 지원으로 나눌 수 있다. 수술 전 지원 방법으로는 수술 모사(surgical simulation)가 대표적이며, 수술중 지원 방법으로는 수술장 내 항법장치(intraop-

erative navigator)와 수술용 로봇(surgical robot)이 대표적인 예라고 하겠다. 현재 척추 분야에서는 척추나사 삽입 지원에 거의 모든 연구개발이 집중되어 있다.

컴퓨터 지원 척추 수술의 방법

1. 수술 모사

수술 모사 소프트웨어로는 척추경 나사 삽입 모사 소프트웨어(pedicle screw insertion simulator)가 대표적인 것이다. 척추경 나사 삽입 모사 소프트웨어는 순수한 개인용 컴퓨터(personal computer)에서 작동하는 소프트웨어로, 전산화 단층촬영(computed tomography, CT) 영상을 다평면 재구성(multi-planar reconstruction) 및 3차원 재구성(three-dimensional [3D] reconstruction)하여 실제 수술을 계획하거나 수술 훈련을 실시할 수 있게 해준다(Fig. 1). 이러한 소프트웨어의 유용성은 이미 입증된 상태이며, 이를 이용한 나사 삽입 모사의 실제 사용이나 이를 이용하여 나사 궤도를 분석한 논문이 다수 보고되어 있다.²⁻⁵⁾

또한 CT의 3차원 재구성 영상을 이용하여, 실물과 같은 크기와

Received January 28, 2013 Revised 0 0, 2013

Accepted January 29, 2013

[✉]Correspondence to: Dong-Bong Lee, M.D.

Department of Orthopaedic Surgery, Seoul National University Bundang Hospital,
82, Gumi-ro 173beon-gil, Bundang-gu, Seongnam 463-707, Korea

TEL: +82-31-787-7190 FAX: +82-31-787-4056 E-mail: spinedb@gmail.com

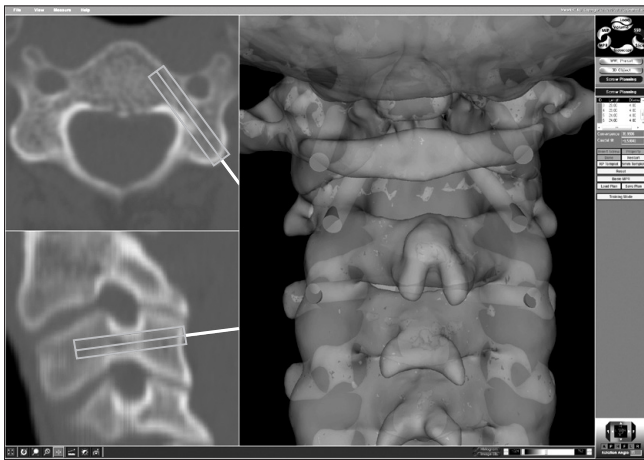


Figure 1. A screen-shot image of simulation software for pedicle screw insertion is shown.

모양을 가진 3차원 실물 조형 모델(rapid prototyping model)을 만들 수 있다. 뼈나 기타 조직의 3차원 실물 조형 모델을 만들면, 이를 절단하거나 이에 나사를 삽입하면서 모의 수술을 시행해볼 수 있을 뿐만 아니라, 실제 수술실에서 이 모델을 보면서 수술을 시행할 수 있다는 장점이 있다.^{6,7)}

2. 수술장 내 항법장치

수술장 내 항법장치는 컴퓨터 내의 영상, 즉 CT나 자기공명영상의 단면 영상이나 3차원 재구성 영상에서의 특정 부위가 실제 환자의 어느 위치에 해당하는지를 알려주고, 환자나 수술기구의 움직임을 실시간으로 추적하여 컴퓨터 내에 있는 환자의 영상에 중첩하여 표시해주는 장치이다. 일반적으로는, 수술 전에 환자의 영상(대부분 CT를 사용)을 얻은 후, 이를 3차원 및 다평면 재구성하여, 수술 계획을 수립하고(수술 계획은 생략되는 경우도 있다), 이 영상과 계획을 기반으로 항법장치의 유도에 따라 수술을 시행하게 된다. 항법장치의 종류에 따라서 영상 획득 방법이나 영상 재구성 방식, 계획의 수립 여부와 방법, 수술 유도 방식이 달라진다. 척추 수술에 사용되는 항법장치는 주로 척추경 나사 삽입 위치와 삽입각을 알려주는 역할을 한다.

1) 수술 기구와 뼈의 추적(tracking)

항법장치는 환자의 뼈나 수술 기구의 움직임을 추적하기 위한 추적장치(tracking system)를 반드시 필요로 한다. 현재까지 개발된 추적장치에는 광학(optical) 추적장치, 자기(magnetic) 추적장치, 음향(acoustic) 추적장치, 레이저(laser) 추적장치가 있지만, 실제로 임상에서 사용되는 것은 광학 및 자기 추적장치뿐이고, 대부분의 항법장치는 광학 추적장치를 사용하고 있다. 광학 추적장치란 적외선을 이용하는 방식으로, 흔히 3-6개의 광학 마커(optical marker)에서 나오는 적외선을 2-3개의 적외선 카메라를 이용

하여 인식하여, 광학 마커가 부착된 수술 기구나 뼈의 위치와 방향을 계산하게 된다. 광학 마커에는 발광 이극관(light-emitting diode, LED)에서 적외선을 방출하는 능동형(active) 마커와 적외선 카메라에서 방출되는 적외선을 반사하는 수동형(passive reflective) 마커가 있다. 이들 마커 3-6개를 수술 기구에 부착한 후, 2-3대의 적외선 카메라로 수술 기구에 부착된 광학 마커의 위치를 실시간(real-time)으로 추적하여, 실제 3차원 공간에서의 마커의 위치 좌표를 컴퓨터에서 계산한다. 수술 기구의 크기와 형태 및 수술 기구에 부착된 광학 마커와 수술 기구의 상대적인 위치를 컴퓨터에 미리 입력해두면(calibration), 적외선 카메라를 이용하여 이들 마커의 위치만을 추적함으로써 수술 기구의 위치와 방향을 계산할 수 있다.

수술 중에는 수술 기구뿐 아니라 환자의 신체 역시 움직이기 때문에, 항법장치는 수술 기구뿐 아니라 환자의 뼈의 위치도 추적하여야 한다. 이를 위해서는 추적이 필요한 뼈에도 마커를 부착하여야 하는데, 보통 뼈에 삽입하는 핀 형태의 기구나 뼈를 잡을 수 있는 집게형 기구 등에 광학 마커를 부착한다. 이를 동적 참조장치(dynamic reference base, DRB)라고 한다. 이 DRB를 뼈에 부착한 후에 적외선 카메라로 DRB의 위치만을 추적하면, 컴퓨터는 해당 뼈의 움직임을 실시간으로 계산함으로써 뼈의 위치를 추적할 수 있다.

2) 환자-영상 간 정합(patient-to-image registration)

수술장 내 항법(항행)은 흔히 영상기반 항법(image-based navigation)과 무영상 항법(image-free navigation)으로 나눌 수 있다. 척추 수술은 물론 전자를 이용하며, CT 기반(CT-based) 항법장치와 C형 투시기(C-arm fluoroscopy)를 이용하는 투시기 기반 항법장치(fluoroscopy-based navigation system)가 전통적으로 사용되어온 대표적인 두 가지 장치이다. CT 기반 항법장치는 컴퓨터 내의 영상(수술 전에 미리 촬영한 CT와 이의 다평면 재구성 영상 및 3차원 재구성 영상)에서의 좌표계와 실물 세계(환자의 뼈와 수술 기구가 위치하는 실제 세계)의 좌표계를 일치시키는 과정을 반드시 필요로 하는데, 이를 환자-영상 간 정합(patient-to-image registration)이라고 한다.^{8,9)}

정합에는 다음과 같은 몇 가지 기법이 있다.¹⁰⁾ 첫 번째는 세 개 이상의 기준 핀(fiducial pin)을 미리 환자의 뼈에 삽입(부착)한 후 CT를 촬영하여 실제 핀의 위치와 CT상의 핀의 위치를 맞춰주는 핀 정합(fiducial registration)이다. 이는 과거에 고관절 및 슬관절 수술에서 사용하던 방법으로, 척추 수술에서는 사용되지 않는다. 두 번째 방법은 핀 삽입 없이 CT를 촬영한 후 정합을 시행하는 무핀 정합(pinless registration)인데, 여기에는 네 가지 방식이 있다. 첫 번째는 해부학적 지표(anatomical landmarks)의 실제 위치와 CT상의 위치를 맞춰주는 점 정합(paired point registration)으로, 그 정확도가 떨어진다. 두 번째는 실제 환자의 골조직의 표면을 마

커가 달린 지시 침으로 무작위로 지시함으로써 입력된 수십 개의 점들이 형성하는 곡면을 CT로부터 만든 컴퓨터 3차원 모델에 일치시키는 표면 정합(surface registration)이다. 세 번째는 표면 정합의 편의성 향상과 수행시간 단축을 위해서 4-6개의 점을 이용한 점 정합을 먼저 시행하여 대략의 위치를 인식시켜준 후에 10여 개의 임의의 점을 추가 입력하여 표면 정합을 시행하는 복합 정합(hybrid registration)이다. 네 번째는 CT로부터 가상의 C형 투시기 영상을 만든 후에, 이를 실제 C형 투시기 영상과 비교하여 정합을 시행하는 CT-fluoro matching이다.

과거에는 CT 촬영 전에 기준 핀을 삽입하는 핀 정합을 주로 사용하였으나, 이는 수술 전에 환자에게 고통을 주어야 하고, 감염의 가능성을 증가시킬 수 있다는 단점이 있어서, 최근에는 무핀 정합을 선호하고 있고, 특히 척추 수술에서는 핀 정합은 사용되지 않는다. 무핀 방식 중, 점 정합(paired point registration)은 정합에 소요되는 시간은 짧지만 해부학적 구조물의 특정 점을 실물과 컴퓨터 영상에서 맞춰준다는 것 자체가 상당한 오차를 일으킬 수밖에 없기 때문에, 실제로는 잘 사용하지 않는다. 표면 정합(surface registration)은 그 정확도는 매우 높지만 정합에 상당한 시간이 걸린다는 단점을 가지고 있다. 최근에는 이 두 방법의 장점을 취한 복합 정합(hybrid registration)이나, CT-fluoro matching이 선호되고 있고, 특히 후자가 더 많이 사용되고 있다.

3) 척추 수술용 항법장치의 종류

척추 수술에 사용되는 항법장치는 크게 네 가지로 나눌 수 있다. 먼저 CT 기반 항법장치의 작동은 다음과 같은 원리를 통해서 이루어진다. 먼저 DRB를 환자의 뼈에 부착한 후에 정합을 마치고 나면, 광학 카메라로 DRB의 위치만을 추적함으로써 해당 뼈의 움직임을 추적할 수 있다. 마커가 부착된 수술 기구(navigated tools)의 위치 역시 광학 카메라로 추적할 수 있기 때문에, 결국 컴퓨터는 환자의 뼈와 수술 기구의 위치를 모두 추적할 수 있고, 이들 간의 상대적 위치를 계산할 수 있다. 정합 과정을 통해서 실물 세계에서의 뼈의 좌표와 CT상의 좌표를 일치시켜주고 나면, 수술 기구의 위치를 다평면 재구성 및 3차원 재구성된 CT 영상에 중첩시켜 보여줄 수 있다.

두 번째로 투시기 기반 항법(fluoroscopy-based navigation)에서는 환자의 뼈에 DRB를 부착한 후에 C형 투시기를 이용하여 수술 중에 필요로 하는 모든 방향의 영상을 얻고 나면, 항법장치 스스로가 일련의 정합과정을 수행하게 된다. 이후 C형 투시기를 제거해도, 항법장치는 미리 촬영한 C형 투시기 영상에서 수술 기구가 어디에 위치하는지를 알려주게 된다.

세 번째로 CT-fluoro matching을 이용한 방법 장치는, 수술 전에 촬영한 CT로부터 컴퓨터는 가상의 투시기(fluoroscopy) 영상을 계산하여, 이 영상과 수술 중에 얻은 실제 투시기 영상을 이용하여 정합을 수행한다. 이 방법은 수술 전 CT 영상과 C형 투시기 영

상 모두에서 수술 기구의 위치를 보여주게 된다.

네 번째는 3차원 C형 투시기 기반 항법(3D C-arm fluoroscopy-based navigation)이다. 3차원 C형 투시기 기반 항법은 대형 투시 장치가 CT의 헤드처럼 자동으로 회전하면서 수십 장의 연속적인 투시 영상을 촬영한 후에, 이를 이용하여 CT와 같은 다평면 재구성 영상 및 3차원 영상을 계산해내는 것으로, Iso-C 3D C-armTM (Siemens AG, Medical Solutions, Erlangen, Germany)과 O-armTM (Meditronic Surgical Navigation Technologies, Louisville, CO, USA)이 대표적인 장비이다.^{11,12)} 이들 장비와 항법장치(navigator)를 연결하면, 수술 전에 미리 CT를 찍을 필요 없이 수술 중에 마커를 부착하고 나서 CT와 유사한 영상을 얻을 수 있기 때문에, 전술한 기준 핀(fiducial registration)과 거의 같은 수준의 상당히 정확한 정합을 얻을 수 있다. 하지만 이러한 장비는 수억 원 대의 고가이기 때문에, 그 사용에는 상당한 제한이 있다.

4) 척추 수술에서의 항법장치의 이용 현황

항법장치는 현재 슬관절 및 고관절 치환술 등에는 종종 사용되고 있으나, 척추 수술에서는 그 사용이 흔하지 않다. 척추 수술에 대한 가장 중요한 제한점은 정확도가 척추 수술에는 아직 적합한 수준이 아니라는 점과, 정확도를 높이기 위해서는 척추의 각 레벨 단위로 정합을 모두 해야 한다는 점이다. 그밖에 시간이 오래 걸리고, 카메라와 마커 사이에 외과의나 수술 기구가 끼어들어 카메라의 시야를 가리면 추적이 중단된다는 단점이 있다. 최근 각광받고 있는 자기 추적장치는 카메라의 시야 문제가 없고, 장치의 크기도 작고, 가격도 저렴하다는 장점이 있지만, 수술장 내의 각종 전자기기에서 발생하는 자기장이나 잡음(noise)의 영향을 받고, 금속성 수술 기구에 의해서도 영향을 받으며, 여러 개의 마커를 동시에 사용할 수 없다는 단점이 있다.

3. 수술용 로봇

정형외과에서 실제 사용되고 있는 로봇들은 크게 능동 로봇(active robot)과 수동 로봇(passive robot)으로 나눌 수 있다. 능동 로봇은 실제 수술의 특정 동작을 수행하는 로봇으로, 인공슬관절 치환술과 인공고관절 치환술에서 골조직의 절삭에 사용되는 RoboDocTM (Integrated surgical systems, Davis, CA, USA)과 RI-OTM (Robotic Arm Interactive Orthopedic System, MAKO Surgical Corp., Ft. Lauderdale, FL, USA)가 대표적인 예라고 할 수 있다.^{13,14)} 수술 전 CT의 다평면 재구성 및 3차원 재구성 영상을 이용하여 적절한 임플란트를 선택하고 뼈를 어떻게 절삭할지를 결정해 주고 난 후, 수술장에서는 적절한 접근을 마친 후에 뼈를 로봇에 고정하고 나서 정합을 마치고 나면, 로봇이 수술 전 계획에 따라 뼈를 절삭하게 된다. 이후 임플란트의 삽입은 외과의가 시행하게 된다.

척추 수술에서는 현재 RenaissanceTM (Mazor Surgical Robotics



Figure 2. An intraoperative photograph of the Renaissance™ robot is shown.

Ltd., Haifa, Israel)라는 소형 로봇(miniature robot system)이 사용되고 있다(Fig. 2).¹⁵⁾ 이 로봇은 실제 천공 작업(drilling)을 하지는 않고, 의사에게 천공할 위치와 삽입각을 알려주는 역할만을 하는 수동 로봇이다. 이 로봇은 3개의 부분으로 구성되어 있다. 두 개의 플레이트 사이를 6개의 액츄에이터(actuator)가 연결하는 평행 로봇(parallel robot)이다. 플레이트 한 개는 환자의 뼈에 고정하게 되고, 다른 플레이트는 드릴 가이드에 부착된다. Renaissance™의 사용을 위해서는 먼저 수술 전에 CT를 촬영하여 3 방향의 2차원 영상을 이용하여 나사 삽입궤도를 결정한다. 수술장에서는 환자의 극돌기에 클램프나 레일을 고정하고, 여기에 정합용 기구를 부착한 후에 C형 투시 장치로 촬영하고 나면, 로봇과 연결된 컴퓨터는 자동적으로 정합(CT-fluoro matching)을 시행하게 된다. 정합용 기구를 제거하고, 그 자리에 로봇을 부착하고 나서, 로봇을 작동시키면 로봇은 나사 삽입위치와 방향에 맞게 드릴 가이드를 움직이게 된다. 이 드릴 가이드를 통해서 천공을 마치고 나면, 로봇을 제거하고 나사를 삽입할 수 있게 된다. 이 로봇은 추적장치를 사용하지 않고 직접 뼈에 고정하기 때문에 정확도가 향상된다는 점이 가장 큰 장점이라고 할 수 있으며, 이는 항법장치보다 유리한 장점이라고 할 수 있다. 향후 로봇이 최소침습 척추 수술(minimal invasive spine surgery, MISS)과 결합하게 되면 그 사용이 보다 보편화될 것으로 전망된다.^{16,17)}

결 어

21세기에는 영상 유도 수술과 로봇을 이용한 수술이 다양한 외과 분야에 도입될 것으로 예상되며, 이들을 기반으로 한 원격수술(tele-surgery) 역시 그 실용 가능성이 예견되고 있다. 컴퓨터 지원 수술 분야 중에서도 매우 까다로운 정확도를 목표로 하고 있는 컴퓨터 지원 척추 수술에서의 정확도의 궁극적인 목표는 오차(표

적 지시 오차 기준) 범위 1 mm 이내이나, 현재까지 개발된 대부분의 시스템들은 1-2 mm의 기계적인 오차 범위를 가지고 있다.¹⁸⁾ 이러한 오차를 감소시키기 위한 연구가 계속 진행되고 있다.

항법장치는 그 정확도의 한계와 고비용으로 인해서 현 시점에서는 척추 수술에 사용되기는 힘들 것으로 생각된다. 즉, 일반적인 관혈적 수술(open procedure)에서는 나사를 정확히 삽입하기 위한 목적으로 항법장치를 사용하는 것은 대부분의 외과의들이 받아들일 수 없는 일이다. 하지만 최소침습 척추 수술이 보급됨에 따라 C형 투시기의 사용이 늘어나고 있기 때문에, 방사선 노출로부터 외과의를 보호하기 위한 목적으로(즉, C형 투시기 사용을 최소화하기 위한 목적으로) 항법장치를 사용하는 예가 해외에서는 차차 증가하는 추세이며, 머지 않아 최소침습 척추 수술과 컴퓨터 지원 척추 수술의 결합이 이루어질 것으로 전망된다. 현재 인공슬관절 치환술에서 항법장치를 사용하는 것이 보편화되어 가고 있는 것과 마찬가지로, 최소침습 척추 수술에서 항법장치나 로봇을 사용하는 것이 보편화될 가능성도 높다고 생각된다.^{16,17)}

컴퓨터 지원 수술은 국내에서는 환상적이고 혁신적인 수술인 것처럼 오도되거나 병원의 홍보나 광고를 위한 상업적 목적으로 이용되는 경우가 있다는 문제점도 가지고 있다. 그러나, 실제로는 기계적 오차가 1-2 mm 정도이고, 사용자(외과의)가 정확한 사용 수칙을 지키지 않을 경우에는 이보다 오차가 더 커질 수밖에 없다는 것은 명백하다. 따라서, 임상적 정확도에 대한 연구(accuracy validation studies)와 이를 향상시키기 위한 연구와 개발이 아직도 많이 필요한 단계이다.¹⁸⁾ 또한 수술의 정확도가 높아진다고 해서 임상적인 결과(clinical outcomes)가 반드시 더 좋아지는 것은 아니므로, 이에 대한 연구(outcomes analysis) 역시 필요하다.¹⁹⁾ 또한, 엄청난 비용에 비해서 얼마나 이익을 얻을 수 있는지에 대한 연구(cost-benefit analysis) 역시 필요할 것이다.²⁰⁾ 마지막으로, 어떠한 장비를 이용하든 가장 중요한 것은 이를 사용하는 외과의의 우수한 판단 능력과 정확한 술기라는 것을 잊지 말아야 할 것이다.

참고문헌

1. DiGioia AM 3rd. What is computer assisted orthopaedic surgery? Clin Orthop Relat Res. 1998;354:2-4.
2. Shin SI, Yeom JS, Kim HJ, Chang BS, Lee CK, Riew KD. The feasibility of laminar screw placement in the subaxial spine: analysis using 215 three-dimensional computed tomography scans and simulation software. Spine J. 2012;12:577-84.
3. Lee JO, Buchowski JM, Lee KM, et al. Optimal trajectory for the occipital condylar screw. Spine (Phila Pa 1976). 2012;37: 385-92.
4. Lee KM, Yeom JS, Lee JO, et al. Optimal trajectory for the atlantooccipital transarticular screw. Spine (Phila Pa 1976).

- 2010;35:1562-70.
5. Nagamoto Y, Ishii T, Iwasaki M, et al. Three-dimensional motion of the uncovertebral joint during head rotation. *J Neurosurg Spine*. 2012;17:327-33.
6. Kawaguchi Y, Nakano M, Yasuda T, Seki S, Hori T, Kimura T. Development of a new technique for pedicle screw and Magerl screw insertion using a 3-dimensional image guide. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012;37:1983-8.
7. Hayashi K, Upasani VV, Pawelek JB, et al. Three-dimensional analysis of thoracic apical sagittal alignment in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2009;34:792-7.
8. Hodges SD, Eck JC, Newton D. Analysis of CT-based navigation system for pedicle screw placement. *Orthopedics*. 2012;35:e1221-4.
9. Miyamoto H, Uno K. Cervical pedicle screw insertion using a computed tomography cutout technique. *J Neurosurg Spine*. 2009;11:681-7.
10. Papadopoulos EC, Girardi FP, Sama A, Sandhu HS, Cammisa FP Jr. Accuracy of single-time, multilevel registration in image-guided spinal surgery. *Spine J*. 2005;5:263-7.
11. Yang YL, Fu BS, Li RW, et al. Anterior single screw fixation of odontoid fracture with intraoperative Iso-C 3-dimensional imaging. *Eur Spine J*. 2011;20:1899-907.
12. Patil S, Lindley EM, Burger EL, Yoshihara H, Patel VV. Pedicle screw placement with O-arm and stealth navigation. *Orthopedics*. 2012;35:e61-5.
13. Hananouchi T, Nakamura N, Kakimoto A, Yohsikawa H, Sugano N. CT-based planning of a single-radius femoral component in total knee arthroplasty using the ROBODOC system. *Comput Aided Surg*. 2008;13:23-9.
14. Mozes A, Chang TC, Arata L, Zhao W. Three-dimensional A-mode ultrasound calibration and registration for robotic orthopaedic knee surgery. *Int J Med Robot*. 2010;6:91-101.
15. Pechlivanis I, Kiriyanthan G, Engelhardt M, et al. Percutaneous placement of pedicle screws in the lumbar spine using a bone mounted miniature robotic system: first experiences and accuracy of screw placement. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2009;34:392-8.
16. Cho JY, Chan CK, Lee SH, Lee HY. The accuracy of 3D image navigation with a cutaneously fixed dynamic reference frame in minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion. *Comput Aided Surg*. 2012;17:300-9.
17. Fraser J, Gebhard H, Irie D, Parikh K, Härtl R. Iso-C/3-dimensional neuronavigation versus conventional fluoroscopy for minimally invasive pedicle screw placement in lumbar fusion. *Minim Invasive Neurosurg*. 2010;53:184-90.
18. Tian NF, Huang QS, Zhou P, et al. Pedicle screw insertion accuracy with different assisted methods: a systematic review and meta-analysis of comparative studies. *Eur Spine J*. 2011;20:846-59.
19. Verma R, Krishan S, Haendlmayer K, Mohsen A. Functional outcome of computer-assisted spinal pedicle screw placement: a systematic review and meta-analysis of 23 studies including 5,992 pedicle screws. *Eur Spine J*. 2010;19:370-5.
20. Härtl R, Lam KS, Wang J, Korge A, Kandziora F, Audigé L. Worldwide Survey on the Use of Navigation in Spine Surgery. *World Neurosurg*. 2013;79:162-72.

컴퓨터 지원 척추 수술

강성식 • 이동봉[✉] • 김호중 • 염진섭

서울대학교 의과대학 분당서울대학교병원 정형외과학교실, 척추센터

컴퓨터 지원 척추 수술은 척추외과학과 컴퓨터 공학, 기계 공학이 융합되어 탄생된 새로운 학문의 분야이다. 수술 전 지원 방법으로는 수술 모사가 대표적이며, 수술 중 지원 방법으로는 수술장 내 항법장치와 수술용 로봇이 대표적인 예이다. 수술 모사는 임상과 기초 연구 분야의 연구에 활용되고 있다. 현재 척추 분야에서의 항법장치의 사용은 척추나사 삽입 지원에 되고 있으나, 정확도의 한계와 고가의 장비 구매에 대한 부담감으로 인해 널리 이용되지는 않고 있다. 향후 컴퓨터 지원 척추 수술은 최소침습 척추 수술과 결합된 형태로 발전할 가능성이 높다. 향후 실제 임상 적용의 정확도, 임상 결과, 비용 편익 분석 등의 연구가 필요하다.

색인단어: 컴퓨터 지원 정형외과 수술, 컴퓨터 지원 척추 수술, 수술 모사, 항법장치, 수술 로봇

접수일 2013년 1월 28일 수정일 2013년 0월 0일 게재확정일 2013년 1월 29일

[✉]책임저자 이동봉

성남시 분당구 구미로 173번길 82, 분당서울대학교병원 정형외과

TEL 031-787-7190, FAX 031-787-4056, E-mail spinedb@gmail.com